
УДК 621.391:621.395

В.В. ПАНТЄЛЄЄВ, М.І. ТАРАСОВ, О.І. ВАКАРІЮК

ІНЖЕНЕРНО-ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ xDSL-ЛІНІЙ

Для забезпечення ефективного абонентського доступу користувачів до широкосмугових інфокомунікаційних послуг створюються відповідні телекомунікаційні засоби, серед яких важливе місце займають цифрові абонентські лінії xDSL. Різноманітність xDSL-технології, та насамперед симетричних по швидкостях передавання повідомлень у протилежних напрямках передачі SDSL, забезпечують високошвидкісний цифровий абонентський доступ (швидкість обміну інформаційними даними $Nr64$ кбіт/с до 2,048 Мбіт/с і більше) по існуючих мідних кабелях місцевої ділянки телефонної мережі (МТМ) загального користування/ телефонної мережі загального користування (Т_фМЗК/Т_фОП). Пропонується методика інженерної оцінки гранично досяжних довжин абонентських SDSL-ліній з детальним виводом узагальненого рівняння довжини. Обговорюється характерна для Т_фМЗК Єдиної національної системи зв'язку України (ЄНСЗ-У) та Взаємозв'язаної мережі зв'язку Російської Федерації (ВМЗ РФ) проблематика оцінки критерію якості QoS цифрового зв'язку по xDSL-лініях на основі 5-бальної шкали MOS щодо забезпечення необхідного запасу щодо завадостійкості NM.

1. Вступ

Надання сучасного інфокомунікаційного мультисервісу з використанням інтегрованого доступу за різнорідними направляючими середовищами, що мають нестационарні параметри та специфічні завадові ситуації, висуває в основу “цифровізації” телекомунікаційних мереж метод “технологічної утилізації” – широкого використання вже існуючих лінійно-кабельних споруд, смугообмежених стандартних каналів, групових і лінійних трактів [1–6].

Відомо [2, 4], що організація цифрових потоків провадиться вторинним ущільненням за допомогою високошвидкісних пристроїв перетворення сигналів (ППС) – професійних високозавадостійких модемів, призначених для перетворення цифрового сигналу у форму, “зручну” для транспортування по даному середовищу розповсюдження. Такі ППС можуть працювати як в основній смузі цифрового лінійно кодованого сигналу (Baseband Modem) [1, 8] без жорстких вимог по частотному обмеженню вихідного енергетичного спектра (“цифрові” модеми), так і як широкосмугові пристрої (Broadband Modem) [2, 17] по смугообмежених каналах електрозв’язку з використанням несучого коливання (“аналогові” модеми). У першому випадку ППС як “цифрові” DSU/CSU-модеми (*DSU/CSU – Data Service Unit/Channel Service Unit*) знайшли своє безпосереднє призначення на фізичних ланцюгах абонентських та з’єднувальних лініях MTM Т_ФМЗК ЄНСЗ-У/ВСС РФ, де використовують xDSL-технології (*xDSL – x-’any’ Digital Subscriber Line*), що добре себе зарекомендували на існуючій телефонній мережі [5, 7]. В другому випадку – ППС як “аналогові” DTE/DCE-модеми (*DTE/DCE – Data Terminal Equipment/Data Circuit-termination Equipment*) працюють з використанням технологій організації цифрових трактів у смузі частот типового широкосмугового каналу DIV (Data-In-Voice), нижче DUV (Data-Under-Voice) і вище DAV (Data-Above-Voice) плану частот групового лінійного сигналу багатоканальної аналогової системи передачі (БСП-ЧастПК) з частотним розподілом каналів (*FDM – Frequency Division Multiplexing*) [15].

Настільки жорсткі вимоги до щонайвищої перешкодозахищеності модемів досягаються комплексом заходів: оптимізації методів організації двопровідного дуплексного зв’язку (FDD – Frequency Division Duplex, TDD – Time Division Duplex, ECH – Echo Cancellation Hybrid, TCM – Time Compression Multiplexing); використанню завадостійкого кодування джерела повідомлень (коди BCH – Bose-Chaudhuri-Hocquenghem, RS – Rid-Solomon, ...); застосуванню багаторівневих протоколів обміну при транспортуванні різнотипної мультимедійної інформації (Frame Relay, ATM – Asynchronous Transfer Mode, TCP/IP – Transmission Control Protocol/Internet Program, ...); вибору методів завадозахищеної передачі й оптимального прийому (Interleaving, TC – Trellis Coding, VD – Viterbi Decoding, ...); адаптивному усуненню ефекту “електричної” луни (EC – Echo Canceller, ES – Echo Suppressor, ...), а також, більшою мірою, організацією цифро-аналогового тракту високоефективними методами модуляції (QAM – Quadrature Amplitude Modulation, CAP – Carrierless Amplitude & Phase, DMT – Digital MultiTone, ...) із комбінацією усього перерахованого вище.

Дійсно, вибір ефективного методу модуляції є тією відправною точкою, первинним рівнем щодо побудови комбінованого цифро-аналогового лінійного тракту, починаючи з якої узагалі має сенс займатися підвищенням вірогідності передачі цифрових повідомлень усіма раніше відомими, дійсними на сьогодні і бурно виникаючими в найближчому майбутньому методами завадостійкого кодування, ефективного транспортування, оптимальної передачі та прийому складних сигналів.

2. Рівняння довжини xDSL-лінії

Гранично досяжні швидкості передачі переносників корисної інформації B ($B – Bearer$) у біт/с ($bit/s – b/s, bps$) визначаються якісними оцінками за завадостійкістю прийнятого сигналу щодо забезпечення необхідних кількісних співвідношень за вірогідністю цифрових повідомлень, що підлягають транспортуванню [13].

Якісною оцінкою завадостійкості прийнятого сигналу є захищеність – різниця рівнів корисного сигналу p_c і перешкоди p_n , що наведені у відносних логарифмічних величинах за потужністю з розмірністю дБп ($dBm – Decibel referred to 1 milliwatt$) або, і це цілком еквівалентно, логарифмічній мірі відносин потужностей сигнал/перешкода P_c/P_n ($SNR – Signal-to-Noise Ratio$) [18]

$$A_3 = p_c[\text{dBm (дБп)}] - p_n[\text{dBm (дБп)}] \equiv \\ \equiv \text{SNR} = 10 \lg \frac{P_c}{P_n}, [\text{dB (дБ)}].$$

Тут і в подальшому [dBm (дБп)] у квадратних дужках наведено розмірності в міжнародних [dBm], а у круглих (дБп) – в альтернативних, насамперед, в українських позначках.

З іншого боку, прийнято, що **кількісною** оцінкою вірогідності інформації, яка міститься в прийнятому цифровому сигналі, є ймовірність помилок $P_{\text{пом}}$ (*BER – Bit Error Rate*), яка при нормальному (гаусовському) сумарному шумі пов'язана з захищеністю A_3 інтегралом імовірності за зворотною функцією помилок *erfc(x)*. Так, при прийнятті рішення про інформаційні символи за амплітудними складовими сигналу (однопараметрична оцінка), що широко використовується в традиційних системах передачі (ЦСП) – “цифрових” DSU/CSU-модемах, імовірність помилок слід оцінювати через рівні передачі сигналу за напругою

$$P_{\text{пом}} \equiv \text{BER} = \text{erfc} \left[\text{dec}(0,05 \cdot A_3) / \sqrt{2} \right], \quad (1)$$

де введено наступне позначення $\text{dec}(x) = 10^x$.

При оптимальному прийнятті рішення за енергетичними складовими сигналу (двопараметрична оцінка), що використовується в професійних ППС – “аналогових” DTE/DCE-модемах, імовірність помилок слід оцінювати через рівні передачі за потужністю корисного сигналу, а саме: за його синфазним (*I – Inphase*) та квадратурним (*Q – Quadrature*) компонентами

$$P_{\text{пом}} \equiv \text{BER} = \text{erfc} \left[\sqrt{\frac{1}{2} \text{dec}(0,01 \cdot A_3)} \right]. \quad (2)$$

Дійсно [16], з рівняння (1) випливає, що для досягнення “оптичної” якості зв'язку $P_{\text{пом}} = 10^{-10}$ при біполярному сигналі типу дворівневий бінарний код свавільного виду (*RZ – Return-to-Zero/NRZ – Non Return-to-Zero*) необхідно забезпечити захищеність цифрового сигналу в DTE/DCE-модемах не менш ніж $A_3^{\text{RZ}}(P_{\text{пом}} = 10^{-10}) \approx 16,2 \text{ dB (дБ)}$. В свою чергу, для “аналогових” DTE/DCE-модемів, що працюють звичайним видом чотирипозиційною фазовою модуляцією типу двократної відносної фазової маніпуляції (*4-PSK – 4 alphabets manipulate Phase-Sift Keying/QPSK – Quadrature Phase-Sift Keying/4-QAM – 4-positional Quadrature Amplitude Modulation/4-CAP – 4-positional Carrierless Amplitude & Phase*) на підставі (2) “оптична” якість зв'язку $P_{\text{пом}} = 10^{-10}$ досягається при захищеності дискретно-аналогового сигналу $A_3^{4\text{-QAM}}(P_{\text{пом}} = 10^{-10}) \approx 16,1 \text{ dB (дБ)}$.

Розрізняють **очікувану** $P_{\text{пом,оч}}$ (практично реалізовану) та **допустиму** $P_{\text{пом,доп}}$ (теоретично нормовану) ймовірності помилок, при чому

$$P_{\text{пом,оч}} \leq P_{\text{пом,доп}},$$

яким відповідають однойменні захищеності сигналу [8, 9]

$$A_{3,оч} \geq A_{3,доп}.$$

При цьому очікувана захищеність сигналу для забезпечення нормованої якості цифрового зв'язку в реальних умовах має бути завжди вище допустимої на величину **технологічного запасу** за необхідною заводстійкістю (*NM – Noise Margin*). Стосовно конкретного виду організації xDSL-лінії це складає значення для “цифрового” DSU/CSU-модему [11] порядку

$$\Delta A_{\text{зап}}^{\text{DSU/CSU}} \equiv \text{NM} = A_{3,оч} - A_{3,доп} \equiv (3...6), [\text{dB (дБ)}] \quad (3)$$

і для “аналогового” DTE/DCE, як більш чутливого устаткування ППС до різного роду дестабілізуючих факторів [12], модему:

$$\Delta A_{\text{зап}}^{\text{DTE/DCE}} \equiv \text{NM} = A_{3,0\text{ч}} - A_{3,\text{доп}} \cong (6 \dots 15), [\text{дБ}(\text{дБ})]. \quad (4)$$

Вказані експлуатаційні вимоги (3) і (4) забезпечували б високу “оптичну” якість зв’язку $P_{\text{пом}} = 10^{-10}$ на допустимому за вірогідністю (*BERT – Bit Error Rate Testing*) рівні роботи пристрою в цілому $A_{3,\text{доп}} (P_{\text{пом,доп}} = 10^{-4} \dots 10^{-7}) \equiv \text{SNR}(\text{BERT} = 10^{-4} \dots 10^{-7})$.

Відзначимо, що очікувана захищеність $A_{3,0\text{ч}}$ під час роботи **одного єдиного** в багатопарному кабелі МТМ найпростішого типу двопровідного модему обмежена тільки рівнем перешкоди луно-сигналу від власного передавача [7]

$$A_{3,0\text{ч}} = P_{\text{пр}} - P_{\text{п}},$$

де $P_{\text{пр}} = P_{\text{пер}} - A_{\text{л}}$ – рівень корисного сигналу на вході вирішального пристрою приймача модему; $A_{\text{л}} = \alpha(f_p) \cdot l_{\text{DSL}}$ – загасання абонентської лінії довжиною l_{DSL} ; $\alpha(f_p)$ – кілометрове загасання кабелю МТМ на розрахунковій частоті f_p , яке обумовлено видом маніпуляції і/чи типом лінійного кодування; $P_{\text{п}} = P_{\text{пер}} - A_{\text{АДЦ}}$ – рівень перешкоди луно-сигналу, що обумовлений перехідним загасанням адаптивної диференціальної системи (АДЦ) у напрямку не проходження, яке перевершує значення $A_{\text{АДЦ}} \geq 50$ дБ й у деяких випадках вноситься в паспортні дані конкретної реалізації дуплексного модему за луно-компенсаційним ECH. Або за часовим TCM розподілом протилежних напрямів передавання верхсхідного (*US – Up Stream*) абонент@станція та внизсхідного (*DS – Down Stream*) станція@абонент високошвидкісних цифрових потоків.

Отже, очікувана захищеність $A_{3,0\text{ч}}$ не залежить від рівня власного передавача, що є в даному випадку основним джерелом перешкоди

$$A_{3,0\text{ч}} = A_{\text{АДЦ}} - \alpha(f_p) \cdot l_{\text{DSL}}. \quad (5)$$

З іншого боку, $A_{3,0\text{ч}}$ для забезпечення нормованої якості цифрового зв’язку (3) або (4), дорівнює

$$A_{3,0\text{ч}} = A_{3,\text{доп}}(P_{\text{пом}}) + \Delta A_{\text{зап}}. \quad (6)$$

На основі отриманих виразів (5) і (6) визначимо **рівняння довжини** найпростішої цифрової абонентської DSL-лінії за наявності одного єдиного в багатопарному кабелю зв’язку модему

$$l_{\text{DSL}} = \frac{A_{\text{АДЦ}} - [A_{3,\text{доп}}(P_{\text{пом}}) + \Delta A_{\text{зап}}]}{\alpha(f_p)}. \quad (7)$$

У рівнянні довжини (7) простішої абонентської DSL-лінії розрахункова частота f_p , на якій спостерігається максимум енергетичного спектра цифрового сигналу (*PSD – Power Spectral Density*), визначена методом маніпуляції і/чи типом лінійного кодування, за допомогою якого “звужується” основна займана смуга спектра лінійного сигналу (основна пелюстка PSD).

Дана DSL-технологія – це одна з найперших, що з’явилися наприкінці 80-х років минулого століття, симетричних технологій організації цифрових абонентських ліній [5], що сьогодні успішно забезпечує базовий доступ до цифрової мережі з інтеграцією служб ISDN-BRA (*Integrated Services Digital Network-Base Rate Access*). Інформаційна швидкість базового інтерфейсу ISDN-BRI (*Integrated Services Digital Network-Base Rate Interface*) визначена двома В-каналами переносниками корисної інформації зі швидкістю 64 kbps (кбіт/с) кожний і додатковим D-каналом (*D – Data*) для передачі даних про сигналізацію зі швидкістю до 16 kbps (кбіт/с) за LAP-D протоколами (*Link Access Procedure-D*). Таким чином, сумарна інформаційна швидкість розглянутого U_0 -інтерфейсу з базовим доступом до мережі ISDN, що дорівнює ISDN-BRI

$$V_{\text{ISDN-BRI}} = 2B + D_{16} = 144 [\text{kbps}(\text{кбіт}/\text{с})],$$

ще додатково збільшується на величину каналу передачі технічної експлуатації, дистанційного контролю і керування (*OAM – Operations, Administration and Maintenance*) так, що в

лінію транспортується агрегатний цифровий потік, за груповою швидкістю передавання відповідно рівній [6]

$$V_{\text{ПРД}} = V_{\text{ISDN-BRI}} + \text{OAM}_{16} = 160 \text{ kbps}[(\text{кбіт/с})].$$

Для транспортування по існуючих абонентських лініях МТМ більш високошвидкісних цифрових, аж до первинного Е1 (і навіть ще вище nE1 понад STM-0/OC-1 чи Ethernet за специфікацією 100/1000 BASE T4) потоків плезіохронних/синхронних ієрархічних рівнів PDH/SDH/SONET (*Plesiochronous/Synchronous Digital Hierarchy/ Synchronous Optical Network*) або для організації первинного доступу до цифрової мережі з інтеграцією служб ISDN-PRA (*Integrated Services Digital Network-Primary Rate Access*) по цифровому каналу європейської/північноамериканської ієрархії H_{12}/H_{11} швидкостей передач використовуються симетричні технології SDSL (*Symmetrical Digital Subscriber Line*), зокрема HDSL-технологія (*High-bit-rate Digital Subscriber Line*). Суть даних щонайвисокошвидкісних технологій [10] полягає в “обміні провідності лінії на її довжину”. Тут за кожною з K -симетричних пар багатопарного кабелю МТМ чи “витих пар” ($TP - Twisted Pair$) LAN-кабелю локальних мереж ($LAN - Local Area Network$) ведеться повнодуплексний зв’язок “розщепленого” за швидкістю передачі цифрового потоку $V_{\text{ПРД}}/K$ практично “звуженого” у K -раз за кількістю пар, займаних відповідною системою абонентського доступу. Крім того, провадиться ефективна компенсація луно-сигналу від власних K -передавачів за допомогою так званого перемереженого луно-компенсатора з репрограмувальною розподіленою RAM-пам’яттю ($RAM - Random Access Memory$) на “переглядних” таблицях [5, 6], що самонавчаються. Реалізована таким способом АДС, має істотно завищене перехідне загасання в напрямку не пропускання, нижня межа якого може перевищувати навіть значення в $A_{\text{АДС}} = 70 \text{ dB (дБ)}$. При цьому відзначимо, що збільшення K -парності використовуваної лінії зв’язку зменшує у відповідну кількість раз інформаційну швидкість передачі даних за кожною парою $V_{\text{Інф}}$ і, як внаслідок цього, розрахункову частоту f_p , організованої таким засобом $2 \times K$ -провідної абонентської xDSL-лінії

$$V_{\text{Інф}} = V_{\text{ПРД}} \cdot \frac{1}{K}. \quad (8)$$

У виразі (8) швидкість агрегатного цифрового потоку, що транспортується в HDSL-лінію

$$V_{\text{ПРД}} = V_{\text{ISDN-PRI}} + \text{OAM}_{8 \times n} > 2,048 \text{ Mbps}[(\text{Мбіт/с})],$$

визначається як провідність зв’язку, міжнародними телекомунікаційними рекомендаціями ІТУ-Т і/чи стандартами ETSI, ANSI, IEEE [20-23] так і безпосередньо фірмами-розробниками апаратури абонентського доступу ($n = 4, 32, 34, 36, 38, \dots$) [14].

Однак, значне підвищення провідності HDSL-лінії до 5×2 (задіяна вся десятка кабелю МТМ) збільшує в порівнянні з чотирипровідною 2×2 системою “пробійну” дальність усього на сотні метрів, що може виявитися економічно не завжди виправданим. Тому більш ніж трипарні 3×2 цифрові HDSL-лінії (причому треті пари досить часто, за відсутності дистанційного живлення, утворені по фантомних ланцюгах) не знайшли широкого поширення на міських мережах для організації “останньої милі” і адміністративно не рекомендовані міжнародними стандартами. Щодо LAN-кабелів стандартів ISO/IEC 11801 [24] і EIA/TIA-568 [25] з різними категоріями Cat. 3, ... Cat. 7 фізичне обмеження провідності обумовлено конструктивністю самого кабелю локальних LAN-мереж, кількість “витих пар” в якому складає усього чотири 4TP, $K = 4$. Крім того, у рівнянні довжини (7) не враховувалася електромагнітна сумісність EMC (*ElectroMagnetic Compatibility*) паралельно працюючих аналогічних систем, що обумовлена перехідними впливами між парами кабелю – лінійними переходами на ближній кінець NEXT (*Near-End CrossTalk*) A_0 , які у даному випадку є визначальними перешкодами, обмежуючими максимальну дальність зв’язку ($A_0 \equiv \text{NEXT} \ll A_{\text{АДС}}$).

Таким чином, урахування електромагнітної сумісності EMC як між паралельно працюючими аналогічними за схемами організації повнодуплексного зв’язку xDSL-системами, так

і за провідністю самої досліджуваної системи дозволяє остаточно уточнити рівняння довжини у такому вигляді

$$l_{\text{xDSL}} = \frac{A_0(f_p) - [A_{\text{з,доп}}(P_{\text{пом}}) + \Delta A_{\text{зап}}] - 10 \lg(N + K - 1)}{\alpha(f_p)}. \quad (9)$$

В узагальненому рівнянні довжини (9) довільною за технологією xDSL-лінії N – кількість пар у багатопарному кабелі, ущільнених паралельно працюючими однотипними цифровими системами абонентського доступу на основі як “цифрового” DSU/CSU, так і “аналогового” DTE/DCE повнодуплексних модемів щодо організації високошвидкісного цифрового зв’язку.

Слід вважати, що ймовірно реальна практична цінність від отриманого узагальненого рівняння довжини (9) може бути досягнута на знову споруджуваних кабельних лініях зв’язку або на ділянках магістральних і/чи зонових мереж, з’єднувальних лініях МТМ, де гарантовані основні параметри багатопарних/багаточетвіркових кабелів зв’язку. На абонентській же ділянці МТМ, де прокладені різнотипні види досить давно існуючих телефонних кабелів, що успішно експлуатуються, але з уже не гарантованими навіть первинними параметрами, має сенс оцінювати не довжину, а загальну величину запасу $\Delta A_{\text{зап}}$ за очікуваною захищеністю NM зв’язку.

3. Оцінка завадостійкості xDSL-лінії

Забезпечення допустимо нормованого за припустимою імовірністю помилок $P_{\text{пом,доп}}$ якості цифрового зв’язку при організації високошвидкісних цифрових абонентських xDSL-ліній провадиться за оцінкою технологічного запасу $\Delta A_{\text{зап}}$ за очікуваною завадостійкістю NM [11, 12] конкретного типу “цифрового” DSU/CSU – чи “аналогового” DTE/DCE-модему відповідно до узагальненого виразу (10)

$$\begin{aligned} \Delta A_{\text{зап}} &= A_0(f_p) - A_{\text{л}}(f_p) - [A_{\text{з,доп}}(P_{\text{пом,доп}}) + 10 \lg(N + K - 1)] \equiv \\ &\equiv NM = \text{NEXT} - \alpha(f) \cdot l_{\text{xDSL}} - [\text{SNR}(\text{BERT}) + 10 \lg(N + K - 1)]. \end{aligned} \quad (10)$$

Тут перехідне загасання міських кабелів зв’язку на ближній кінець $A_0(f_p) \equiv \text{NEXT}$ на розрахунковій частоті f_p може бути знайдене як нижня межа з наступної апроксимаційної залежності [8, 22]

$$A_0(f_p) = 69,5 - 10 \lg \frac{f_p}{f_0 = 1020 \text{ Hz (Гц)}}, [\text{dB (дБ)}];$$

{примітка 1: дане положення впливає з технологічного процесу самого виробництва, монтажу за принципом “холодної” скрутки та старіння існуючих багатопарних міських кабелів зв’язку, а саме: 90 % усіх комбінацій пар кабелю повинні мати перехідне загасання на ближній кінець NEXT не гірше 69,5 dB (дБ) у тональному діапазоні частот за раніше існуючими $f_0 = 800 \text{ Hz (Гц)}$ і дійсними $f_0 = 1020 \text{ Hz (Гц)}$ сучасними нормами}, $A_{\text{л}}(f_p)$ – загасання абонентської xDSL-лінії зв’язку на розрахунковій частоті f_p довжиною l_{xDSL}

$$A_{\text{л}} = \alpha(f_p) \cdot l_{\text{xDSL}}, [\text{dB (дБ)}],$$

в якому кілометричне загасання кабелю $\alpha(f_p)$, верхня межа якого в практичних умовах за наявності паспортних даних тільки на тональній частоті $\alpha_{0,8} \equiv \alpha(f_0 = 800 \text{ Hz})$, може бути знайдена з емпіричної формули

$$\alpha(f_p) = \alpha_{0,8} \sqrt{\frac{f_p}{f_0 = 800 \text{ Hz (Гц)}}}, [\text{dB/km (дБ/км)}];$$

$A_{\text{з,доп}}(P_{\text{пом,доп}})$ – допустима захищеність сигналу для забезпечення необхідного за вірогідністю нормованого рівня ймовірності помилок $P_{\text{пом,доп}}$, що із прийнятною для експлуатації 6% точністю визначена апроксимаційним виразом виду

$$A_{3, \text{доп}}(P_{\text{пом, доп}}) = \frac{A_{3, \text{доп}}(P_{\text{пом}} = 10^{-10})}{2} \{1 + \lg[-\lg(P_{\text{пом, доп}})]\};$$

$A_{3, \text{доп}}(P_{\text{пом}} = 10^{-10})$ – допустима захищеність для досягнення “оптичної” якості зв’язку $P_{\text{пом}} = 10^{-10}$ для “цифрового” (11) DSU/CSU [16, 19]

$$\begin{aligned} \Delta A_{3, \text{доп}}^{\text{DSU/CSU}}(P_{\text{пом}} = 10^{-10}) &= A_3^{\text{RZ}}(P_{\text{пом}} = 10^{-10}) + \Delta\alpha_3 = \\ &= A_3^{\text{RZ}}(P_{\text{пом}} = 10^{-10}) + 20\lg(L-1) = 16,2 + 20\lg(L-1) \end{aligned} \quad (11)$$

або для “аналогового” (12) DTE/DCE [16, 19]

$$\begin{aligned} \Delta A_{3, \text{доп}}^{\text{DTE/DCE}}(P_{\text{пом}} = 10^{-10}) &= A_3^{4\text{-QAM}}(P_{\text{пом}} = 10^{-10}) + \Delta\alpha_3 = \\ &= A_3^{4\text{-QAM}}(P_{\text{пом}} = 10^{-10}) + 10\lg\left(\frac{M-1}{3}\right) = 16,1 + 10\lg\left(\frac{L^2-1}{3}\right) \end{aligned} \quad (12)$$

модемів розбудови xDSL-ліній; L – число дозволених рівнів цифрового QAM-сигналу; $M = L^2$ – число дозволених точок сигнального сузір’я складного виду M -позиційного амплітудно-фазо-маніпульованого QAM-сигналу.

Розрахункова частота f_p , на якій провадиться оцінка перешкодозахищеності цифрової абонентської xDSL-лінії при використанні “цифрового” DSU/CSU-модему – це $f_p^{\text{DSU/CSU}}$ напівтактова лінійна частота f_T або повністю їй еквівалентна за значенням модуляційна швидкість передачі V_M , [Baud(Бод)], яка чисельно дорівнює

$$V_M \equiv f_T \equiv V_{\text{Инф}} \cdot \frac{n}{m}, \text{ [Baud(Бод)]}, \quad (13)$$

де n і m – параметри блочного коду загального виду $mBnL$, в якому на m бінарних символів B відводиться n символів L -позиційних.

До таких типових в інфокомунікаціях лінійних/стикувальних/інтерфейсних кодів слід віднести: двійкові [1-5, 22] Manchester, RZ/NRZ, 4B5B/8B10B, CMI, 2-TC PAM; трійкові [1-5, 20] А М І (Ч П І) / Н Д В 2 / Н Д В 3 (К В Щ О 3) / В 3 Z S / В 6 Z S / В 8 Z S, 3 В 2 Т (SU 32)/4В3Т (MMS 43)/8В6Т; четвіркові [1-5, 21] 2В1Q, 4-TC PAM; п’ятіркові [1-5, 23] 9В4QI, 4D-PAM5/8В1QI4 й інші [1-5, 22] 8/16/32-TC PAM {*примітка 2*: якщо L дорівнює: 2 позначають символи блочного коду як “B - Binary”; 3 “T - Ternary”; 4 “Q - Quaternary”; 5 “Q_I - Quinary”; 6 “S - Sextenary”; 7 “H - Heptanary”, ...}.

На розрахунковій півтактовій частоті $f_p^{\text{DSU/CSU}} = f_T/2 \equiv V_M/2$ спостерігається максимум енергетичного спектра PSD, то при використанні $2 \times K$ -провідної системи (8), поряд з визначеним видом лінійного кодування (13), за допомогою яких додатково та багатократно “звужується” основний пелюсток PSD, остаточно отримаємо

$$f_p^{\text{DSU/CSU}} = \frac{f_T}{2} \equiv \frac{V_M}{2} = \frac{V_{\text{Инф}}}{2} \cdot \frac{n}{m} = \frac{V_{\text{ПРД}}}{2} \cdot \frac{1}{K} \cdot \frac{n}{m}. \quad (14)$$

Для “аналогового” DTE/DCE-модему розрахункова частота f_p – це $f_p^{\text{DTE/DCE}}$ максимальна частота лінійного сигналу, на якій спостерігається максимальне за значенням кіломертичне загасання $\alpha(f_p^{\text{DTE/DCE}})$ місцевого кабелю МТМ

$$f_p^{\text{DTE/DCE}} = f_{\text{мін}} + \Delta F^{\text{M-QAM}}, \quad (15)$$

де $\Delta F^{\text{M-QAM}}$ – ефективно передана смуга частот M -позиційного QAM-сигналу

$$\begin{aligned} \Delta F^{\text{M-QAM}} &\equiv V_M \cdot (1 + \alpha_N) = \\ &= \frac{V_{\text{Инф}}}{\log_2 M} \cdot (1 + \alpha_N) = \frac{V_{\text{ПРД}}}{\log_2 M} \cdot \frac{1}{K} \cdot (1 + \alpha_N); \end{aligned} \quad (16)$$

α_N – коефіцієнт згладжування імпульсу найквістовської форми ($0 \leq \alpha_N \leq 1$) [4], що у практичних умовах знаходиться в межах $\alpha_N = 0,1 \dots 0,25$; f_{\min} – мінімальна робоча смуга енергетичного спектра PSD, що займана “аналоговим” DTE/DCE-модемом ΔF^{M-QAM} і приділяється з урахуванням передачі тональних мовних сигналів, починаючи від граничних частот, які можуть дорівнювати значенню в зазначених рекомендаціях та стандартах [20–23] межах $\{3,98 \dots 4,0\}$ kHz (кГц).

Зазначимо, що при використанні завадостійкого гратчастого кодування TC, забезпечується вигравш за позиційністю сигнального сузір’я QAM-сигналу, еквівалентний збільшенню на 1 кількості інформаційних біт, тобто рівняння (16) займаної смуги передачі набуває такого вигляду

$$\Delta F^{M-QAM/TC} \equiv \frac{V_{\text{прд}}}{\log_2 M - 1} \cdot \frac{1}{K} \cdot (1 + \alpha_N). \quad (17)$$

Слід особисто зазначити, що оцінка технологічного запасу $\Delta A_{\text{зап}} \equiv NM$ за виразом (10) отримано з узагальненого рівняння довжини (9) для знову споруджуваних кабельних ліній зв’язку за наявності точних зведень про вторинні параметри $A_0(f_p)$ і $\alpha(f_p)$ на розрахунковій частоті f_p . У відсутності ж точних даних про вторинні параметри кабелів MTM (досить частий випадок, що спостерігається на практиці), а також про реальну довжину абонентської лінії і її тип (можливо навіть складеної і/чи комбінованої ділянки фізичного ланцюга) необхідно провадити вимір перехідного загасання на ближній кінець $A_0(f_p) \equiv \text{NEXT}$ і загасання лінії зв’язку $A_L(f_p) = \alpha(f_p) \cdot l_{\text{xDSL}}$ на розрахунковій частоті f_p конкретного модему, що використовується для організації xDSL-лінії. В свою чергу, розрахункові частоти f_p як для “цифрових” DSU/CSU, так і для “аналогових” DTE/DCE-модемів відповідно до виразів (13)-(17), систематизовані для міжнародних рекомендацій ITU-T і стандартів ETSI/ANSI/IEEE [20-25], а також за корпоративними внутрішніми стандартами деяких компаній, і зведені в табл. 1 і 2.

Таблиця 1

Рекомендація/Стандарт	Серія/Номер	Швидкість агрегатного потоку $V_{\text{прд}}$, кбіт/с	Метод організації 2-х провідного дуплексу	Тип лінійного коду	Швидкість модуляції, кБод	Розрахункова частота, f_p , кГц
ITU-T	I.412 I.430 G.961	160	Луно-компенсаційний ECH	4В3Т (MMS 43)	120	60
		160	Луно-компенсаційний ECH	2В1Q	80	40
ETSI	ETR 080 TS 102 080 ETS 303 297	162	Луно-компенсаційний ECH	3В2Т (SU 32)	108	54
		320	Часовий TCM	АМІ (ЧПІ)	320	160

Таблиця 2

Рекомендація/Стандарт	Серія/Номер	Кількість робочих пар К системи	Швидкість агрегатного потоку $V_{\text{прд}}$, кбіт/с	Швидкість передачі $V_{\text{лф}}$ за кожною парою, кбіт/с	Тип лінійного сигналу/коду	Швидкість модуляції за кожною парою, кБод	Коефіцієнт згладжування лін. спектра	Розрахункова частота, f_p , кГц
ITU-T	G.991.1 G.991.2	1	2320	2320	2В1Q	1160	2	485,00
			192 ... 2304 з кроком 8	192 ... 2304 з кроком 8	128-CAР/TC	386,667	0,15	448,67
					16-CAР/TC	768 _{макс}	2	384,00 _{макс}
ETSI	TS 101 135 ETR 152 TR 101 830-1	2	2336	1168	2В1Q	584	2	292,00
			384 ... 4624 з кроком 16	192 ... 2304 з кроком 8	64-CAР/TC	233,600	0,15	272,62
					16-CAР/TC	770,667 _{макс}	2	385,33 _{макс}
		3	2352	784	2В1Q	392	2	196,00

4. Висновки

Таким чином, під узагальнюючим критерієм якості QoS цифрового зв'язку в xDSL-лініях розумітимемо запас NM (Noise Margin) за очікуваною у реальних на експлуатації умовах перешкодозахищеністю сигналу $\Delta A_{\text{зап}}$ для конкретного багаторівневого L лінійно-го кодування і/чи багатопозиційного M виду маніпуляції, які використовуються в “цифрових” DSU/CSU або в “аналогових” DTE/DCE модемах, відповідно.

Даний рівень якості стосовно нестационарного направляючого середовища розповсюдження, до якого відносяться фізичні ланцюги кабелів зв'язку МТМ Т_ФМЗК, рекомендується оцінювати суб'єктивними способами [12, 15]. До таких суб'єктивних критеріїв можна віднести, зокрема, експертні оцінки за 5-бальною таблицею усереднених міркувань MOS (Mean Opinion Score), за які приймемо рівень запасу очікуваної завадостійкості

$\Delta A_{\text{зап}}^{\text{DSU/CSU}} \equiv \text{NM}$ (3) “цифрових” DSU/CSU-модемів [12] відповідно до наведеної нижче табл. 3.

Таблиця 3

Критерій MOS якості зв'язку QoS	Запас за очікуваною завадостійкістю NM xDSL-лінії, яка організована "цифровим" DSU/CSU-модемом, дБ	Рівень якості цифрового зв'язку по xDSL-лінії
0	нижче 0	зв'язок несталый
1	0	поганий
2	$0 < \text{NM} \leq 1,5$ (поріг у $\sqrt{2}$ разів за напр.)	незадовільний
3	$1,5 < \text{NM} \leq 3$ (поріг у 2 рази за напр.)	задовільний
4	$3 < \text{NM} \leq 6$ (поріг у 2 рази за потужн.)	добрий
5	вище 6	високий

Таблиця 4

Критерій MOS якості зв'язку QoS	Запас за очікуваною завадостійкістю NM xDSL-лінії, яка організована "цифровим" DSU/CSU-модемом, дБ	Рівень якості цифрового зв'язку по xDSL-лінії
0	0 і нижче	зв'язок несталый
1	$0 < \text{NM} \leq 1,5$ (поріг у $\sqrt{2}$ разів за напр.)	поганий
2	$1,5 < \text{NM} \leq 3$ (поріг у 2 рази за напр.)	незадовільний
3	$3 < \text{NM} \leq 6$ (поріг в 2 рази за потужн.)	задовільний
4	$6 < \text{NM} \leq 15$ (щодо найгірших умов)	добрий
5	вище 15	високий

Стосовно “аналогових” DTE/DCE-модемів, як більш чутливого пристрою ППС до різноманітних дестабілізуючих факторів $\Delta A_{\text{зап}}^{\text{DTE/DCE}} \equiv \text{NM}$ (4), рівні якості QoS можна визначити таблицею MOS [15] на підставі зведеної табл. 4.

Список літератури: 1. Боккер П. ISDN. Цифровая сеть с интеграцией служб: Понятия, методы, системы / Пер. с нем. Э.Б. Ершовой и Э.В. Кордонского. М.: Радио и связь, 1991. 304 с. 2. Боккер П. Передача данных: Техника связи в системах телеобработки данных. Том 1. Основы / Пер. с нем. под ред. Д.Д. Кловского. М.: Связь, 1980. 204 с. 3. Bocker P., Arndt G. ISDN. The Integrated Services Digital Network: Concepts, Methods, Systems. Berlin-Heidelberg-New York-Tokyo: Springer-Verlag, 1992. 258 p. 4. Bocker P. Datenubertragung: Nachrichtentechnik in Datenfernverarbeitungssystemen. Berlin-Heidelberg-New York: Springer-Verlag, 1976. 5. Deniz D.Z. ISDN and it's Applications to LAN Interconnection. London: McGRAW-HILL Book Company Europe, 1994. 254 p. 6. Durd N. The ISDN Subscriber Loop. London: Chapman and Hall, 1997. 475 p. 7. Гамидов Г.С., Пантелеев В.В., Яценко С.Г. Двухпроводное дуплексное устройство преобразования сигналов УПС-64 с эхокомпенсатором // Электросвязь. 1989. № 1. С. 36-39. 8. Брескин В.А., Пантелеев В.В. Адаптивная регенерация цифровых сигналов в проводных ЦСП для абонентских

линий // Электросвязь. 1994. № 11. С. 12-14. **9.** Кирилов В.И., Белко А.И. Расчет длины регенерационного участка для ЦСП по технологиям HDSL и SDSL // Электросвязь. 2001. № 10. С. 20-23. **10.** Мирошников Д.Г. Новое поколение систем xDSL // Вестник связи. 2001. № 2. С. 30-35. **11.** Кочеров А.В., Тарасов А.И. Эксплуатационная надежность цифровых абонентских линий // Вестник связи. 2005. № 6. С. 70-74. **12.** Карпишин В.И., Мышляков С.И., Пантелеев В.В. Инженерно-эксплуатационные методы расчета предельных длин симметричных цифровых абонентских линий по xDSL-технологиям для существующих кабелей связи ГТС // Вісник УНДІЗ. 2006. № 1. С. 12-21. **13.** Пантелеев В.В. Предельная пропускная способность двухпроводных дуплексных систем связи // Зб. наук. праць інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.С. Пухова НАН України. 2006. Вип. 36. С. 157-160. **14.** Серых С.А., Соловьев В.Р. Технология xDSL в Украине - решение проблемы медных жил // Зв'язок. 2001. № 3. С. 18-21. **15.** Курицын Е.М., Пантелеев В.В. Сценарии организации цифровых трактов для ВЧ-связи по высоковольтным линиям электропередачи // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. Одесса: Изд. «Нептун-Технологии», 2007. № 1(67). С. 3-12. **16.** Thomas C.M., Weidner M.Y., Durrani S.H. Digital amplitude-phase keying with M-ary alphabets // IEEE Trans. Commun. 1974. Vol. COM-22, No. 2. P. 168-180. **17.** Ghamberlin J.W., Hester C.E., Meyers J.J., et al. Design and field test of a 256-QAM DIV modem // IEEE Journal on Selected Areas in Commun., 1987. Vol. SAC-5, No. 3. P. 349-356. **18.** Panteleev V.V. Estimation's method at most attainable of lengths a symmetrical digital subscriber line on xDSL-technologies: engineering-maintenance of the calculation // Inter. Conf. "Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science". Lviv: Publishing House of Lviv Polytechnic. 2006. Vol. TCSET'2004. P. 365-369. **19.** Panteleev V.V., Tarasov N.I. At most attainable of lengths a symmetrical digital subscriber line on xDSL-technologies: engineering-maintenance methods of the calculation // Proc. of IEEE "East-West Design & Test Workshop". 2009. Vol. EWDTW'09. Moscow: Publishing IEEE, Inc., P. 234-240. **20.** ITU-T Recommendations <http://www.itu.int/rec/T-REC/en> G.233, G.Sup.28, G.703, G.707, G.961-G.963, G.991-G.993, I.412, I.430, I.431. **21.** ETSI Standards <http://pda.etsi.org/pda/queryform.asp>: TS 101 012, TS 101 135, TS 101 524, TS 101 270, TS 102 080, TR 101 830, ETR 080, ETR 152, ETS 303 297. **22.** ANSI/ATIS (T1) Standards <http://www.atis.org>: T1.413-1998, T1.417-T1.424; T1.TR.28-1994, T1.TR.59-1999; T1.TRQ.06-2001. **23.** IEEE 802™ Standards <http://standards.ieee.org/getieee802/802.3.html>: IEEE 802.3-2008, IEEE 802.3at-2009, IEEE 802.3av-2009, IEEE 802.3bc-2009. **24.** Standards ISO/IEC <http://webstore.ansi.org>: ISO/IEC 11801:2002, ISO/IEC 14763-3:2006. **25.** Standards TIA <http://www.tiaonline.org>: EIA/TIA-568-A/B/C.

Надійшла до редколегії 17.07.2010

Пантелєєв Віктор Володимирович, канд. техн. наук, доцент, директор ТОВ «ТЕЛНЕТ» з інфокомунікацій <http://www.uptel.net>. Наукові інтереси: оптимальний прийом складних сигналів, що транспортуються по нестационарним середовищам. Адрес: Україна, 65020, Одеса, вул. Розкидайлівська, 18, офіс 55, тел. (+38048) 730-99-99, 730-91-81, факс: (+38048) 730-91-11, 730-91-20, e-mail: pvv@odtel.net; <http://www.wi-max.net.ua>.

Тарасов Микола Іванович, канд. техн. наук, вед. наук. співроб. відділу ЦСП ДП «ОНДІЗ». Наукові інтереси: високошвидкісні цифрові абонентські лінії xDSL. Адрес: Україна, 65026, Одеса, вул. Буніна, 23, тел. (+380 48) 722-63-97, 722-19-71, факс: (+380 48) 722-20-74, 730-63-78, e-mail: tarasov@oniis.org.ua; <http://www.oniis.org.ua/oniis>.

Вакарюк Олександр Іванович, нач. комерційного відділу ТОВ «ТЕЛНЕТ» <http://www.uptel.net>. Наукові інтереси: якість обслуговування QoS та якість сприймання абонентом QoE. Адрес: Україна, 65020, Одеса, вул. Розкидайлівська, 18, офіс 54, тел. (+380 48) 730-99-99, 730-91-04, факс: (+380 48) 730-91-11, 730-91-20, e-mail: cavedog@uptel.net; <http://www.wi-max.net.ua>.